

С. М. Первунінський, д.т.н., професор,

e-mail: cherkpervun@rambler.ru

В. В. Олексюк, аспірант,

e-mail: vadim.oleksuk@gmail.com

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ МОДЕМА МНОЖИННОГО ДОСТУПУ ШУМОВИХ СИГНАЛІВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ КВАДРАТИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ

Питання удосконалення модемів з шумовими сигналами передбачає підвищення точності теоретичного аналізу завадостійкості запропонованих методів демодуляції інформаційних складових сигналів. Демодулятор, для якого проводиться аналіз, характеризується тим, що у функціоналі для оцінювання прийнятого інформаційного біта містяться складові з різними законами розподілу ймовірностей. Врахування впливу квадратичної складової на завадостійкість модема множинного доступу в аналізі виконано вперше. У статті досліджується завадостійкість модема множинного доступу, що використовує як несучу шумові гауссові сигнали. Отримано аналітичні вирази для обчислення завадостійкості модема, коли кожний користувач системи використовує бінарний цифровий демодулятор переданого сигналу. Завадостійкість модема множинного доступу проаналізовано з урахуванням впливу вхідних складових сигналу, що апроксимовані гауссовим та Хі-квадрат законами розподілу ймовірностей. Отримані теоретичні оцінки завадостійкості цифрового модема множинного доступу перевірені на імітаційній моделі. Теоретичні результати аналізу дали змогу визначити залежність завадостійкості цифрового демодулятора від кількості відліків вхідного сигналу на тактовому інтервалі. Встановлено оптимальні значення кількості відліків залежно від кількості користувачів системи та перевищення сигналу над завадою в адитивному гауссовому каналі зв'язку.

Ключові слова: автокореляційна система зв'язку, множинний доступ, шумовий сигнал, квадратична складова, завадостійкість.

Вступ. Сучасний стан розвитку елементної бази радіосистем стимулює як покращення існуючих традиційних систем, так і дослідження альтернативних методів передачі інформації. Немале значення у вдосконаленні систем передачі інформації мають дослідження модемів з використанням як інформаційної несучої сигналу з розширеним спектром.

Практичну значимість і науковий інтерес отримали розробки автокореляційних систем передачі цифрової інформації з використанням як несучої хаотичних і шумових сигналів.

Постановка проблеми. На виході автокореляційного модулятора сигнал має вигляд [1]

$$x(t) = \xi(t) + \sum_{i=1}^K \alpha_i \xi(t - \tau_i), \quad t = 0; T, \quad (1)$$

де $\alpha_i \in \{-1; +1\}$ – переданий інформаційний символ i -го користувача, що відповідає логічним бінарним сигналам «0» та «1» відповідно; K – кількість користувачів; T – довжина сим-

вольного інтервалу; $\xi(t)$ – опорний шумовий сигнал.

На вхід демодулятора приходить сигнал вигляду

$$y(t) = x(t) + n(t), \quad (2)$$

де $n(t)$ – завада типу білого гауссового шуму, що додається в каналі зв'язку.

В демодуляторі на виході i -го корелятора отримуємо значення сигналу

$$\mathcal{G}_i = \int_0^T y(t) \cdot y(t - \tau_i) dt. \quad (3)$$

Пристрій прийняття рішення по значенню $\mathcal{G}_i$ визначає оцінку сигналу i -го користувача $\hat{\alpha}_i = 1$, якщо сигнал на виході корелятора має додатне значення ($\mathcal{G}_i \geq 0$), інакше $\hat{\alpha}_i = -1$.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Перші матеріали про системи з шумовими сигналами надані в роботі [3]. Подальші питання удосконалення систем телекомунікацій з використанням шумових сигналів розгля-

далися рядом учених, зокрема, Г. Колумбаном [4], Вай М. Там [5]-[6], Ф. Лай [7].

Дослідження завадостійкості систем автокореляційного типу в більшості випадків проводять з використанням гауссової апроксимації випадкових величин (ВВ). У роботі [2] розглянуто оцінювання завадостійкості такої системи з наявною квадратичною складовою у складі $\mathcal{G}_i$ з апроксимацією її гауссовим розподілом при використанні аналогового принципу обробки вхідних сигналів. Це дало змогу спростити аналіз, але призвело до втрати точності теоретичної оцінки й ускладнює практичну реалізацію аналогового демодулятора.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. У цій роботі проведено аналіз завадостійкості цифрового модема з урахуванням розподілу Хі-квадрат для квадратичної складової сигналів демодулятора, що дає змогу збільшити точність теоретичної оцінки завадостійкості модема.

Мета роботи. Аналіз завадостійкості цифрового модема множинного доступу шумових сигналів з урахуванням впливу квадра-

тичної складової у демодуляторі, коли як складова $\xi(t)$ використовується центрований білий гауссовий шум.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи досягнення мікроелектроніки, розглянемо реалізацію демодулятора з використанням цифрових алгоритмів обробки сигналів. Сигнал $y(t)$, що описаний виразом (2), на виході аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) після квантування в часі з інтервалом Δ можна представити вектором

$$\bar{y} = \bar{\xi}_0 + \sum_{i=1}^K \alpha_i \bar{\xi}_i + \bar{n}_0, \quad (4)$$

де $\bar{\varphi}_i$, $\bar{\varphi}_i \in \{\bar{y}; \bar{\xi}_i; \bar{n}_i\}$ – вектор з N елементами, що представляє проквантовані в часі складові

$$\bar{\varphi}_i = \{\varphi_{i,m}(t_m - \tau_i), \quad i = \overline{0, K}, \quad m = \overline{1, N}\},$$

$$\tau_0 = 0, \quad t_m = m\Delta.$$

Сигнал $\mathcal{G}_i$ на вході порогового пристрою (на виході корелятора) запишемо у вигляді

$$\mathcal{G}_i = \left\langle \bar{\xi}_0 + \sum_{j=1}^K \alpha_j \cdot \bar{\xi}_j + \bar{n}_0, \bar{\xi}_i + \sum_{j=1}^K \alpha_j \cdot \bar{\xi}_{j+i} + \bar{n}_i \right\rangle, \quad (5)$$

де $\langle \bar{v}_j, \bar{s}_{j+i} \rangle = \sum_{m=1}^N v_{j,m} \cdot s_{j+i,m}$ – скалярний добуток векторів $\bar{v}_j$ та $\bar{s}_{j+i}$; $v, s \in \{\xi; n\}$, $\bar{s}_{j+i}$ – вектор, що представляє складову $s(t_m - \tau_j - \tau_i)$.

Розглянемо завадостійкість автокореляційної системи множинного доступу, визначивши залежності ймовірності виникнення помилки P_{BER} при передачі біта, яка залежить як від відношення перевищення сигналу над завадою, так і від кількості відліків символного інтервалу N .

$$\eta_{11} = \langle \bar{\xi}_0, \bar{\xi}_i \rangle = \sum_{m=1}^N \xi_{0,m} \cdot \xi_{i,m};$$

$$\eta_{13} = \langle \bar{\xi}_0, \bar{n}_i \rangle = \sum_{m=1}^N \xi_{0,m} \cdot n_{i,m};$$

$$\eta_{22} = \left\langle \sum_{j=1}^K \alpha_j \cdot \bar{\xi}_j, \sum_{j=1}^K \alpha_j \cdot \bar{\xi}_{j+i} \right\rangle = \sum_{j=1}^K \alpha_j \sum_{z=1}^K \alpha_z \sum_{m=1}^N \xi_{j,m} \cdot \xi_{z+i,m};$$

$$\eta_{33} = \langle \bar{n}_0, \bar{n}_i \rangle = \sum_{m=1}^N n_{0,m} \cdot n_{i,m}.$$

Виходячи з (5), запишемо

$$\mathcal{G}_i = \sum_{i,j=1}^3 \eta_{ij}, \quad (6)$$

де позначено:

$$\eta_{12} = \left\langle \bar{\xi}_0, \sum_{j=1}^K \alpha_j \cdot \bar{\xi}_{j+i} \right\rangle = \sum_{j=1}^K \alpha_j \sum_{m=1}^N \xi_{0,m} \cdot \xi_{j+i,m};$$

$$\eta_{21} = \left\langle \sum_{j=1}^K \alpha_j \cdot \bar{\xi}_j, \bar{\xi}_i \right\rangle = \sum_{j=1}^K \alpha_j \sum_{m=1}^N \xi_{j,m} \cdot \xi_{i,m};$$

$$\eta_{23} = \left\langle \sum_{j=1}^K \alpha_j \cdot \bar{\xi}_j, \bar{n}_i \right\rangle = \sum_{j=1}^K \alpha_j \sum_{m=1}^N \xi_{j,m} \cdot n_{i,m};$$

$$\eta_{31} = \langle \bar{\xi}_i, \bar{n}_0 \rangle = \sum_{m=1}^N \xi_{i,m} \cdot n_{0,m};$$

$$\eta_{32} = \left\langle \sum_{j=1}^K \alpha_j \cdot \bar{\xi}_{j+i}, \bar{n}_0 \right\rangle = \sum_{j=1}^K \alpha_j \sum_{m=1}^N \xi_{j+i,m} \cdot n_{0,m};$$

Для обчислення оцінки завадостійкості модема необхідно знайти значення математичного сподівання та дисперсії випадкової величини $\mathcal{G}_i$. Визначимо значення початкових моментів першого порядку для величини (6). Враховуючи некорельованість відліків $\xi_{j,m}$, знайдемо математичне сподівання скалярного добутку для елемента η_{11}

$$\begin{aligned} m_1(\eta_{11}) &= M \left\{ \sum_{m=1}^N \xi_{0,m} \cdot \xi_{i,m} \right\} = \\ &= \sum_{m=1}^N [M \{ \xi_{0,m} \} \cdot M \{ \xi_{i,m} \}] = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогічним чином, для інших доданків з (6) маємо

$$\begin{aligned} m_1(\eta_{ij}) &= 0, \\ i, j &= \overline{1,3}, \quad i \neq 2 \text{ \& } j \neq 1. \end{aligned} \quad (8)$$

Для величини $m_1(\eta_{21})$ маємо

$$m_1(\eta_{21}) = \alpha_i \cdot \sigma_\xi^2 \cdot N.$$

Додаючи значення моментів першого порядку складових у (6), отримаємо

$$m_1(\mathcal{G}_i) = M \{ \mathcal{G}_i \} = \alpha_i \cdot \sigma_\xi^2 \cdot N, \quad i = \overline{1,K}.$$

Для визначення дисперсії випадкової величини (ВВ) $\mathcal{G}_i$ необхідно обрахувати моменти другого порядку

$$m_2(\mathcal{G}_i) = M \left\{ \sum_{i,j=1}^3 \eta_{ij} \right\}^2,$$

що містять доданки початкових моментів другого порядку від ВВ $\eta_{i,j}$, $i, j = \overline{1,3}$, і змішані моменти (кореляцію) від добутку $\eta_{i,j} \cdot \eta_{n,k}$, $i, j, n, k = \overline{1,3}$, $i, j \neq n, k$.

Враховуючи, що $\xi(t)$ – дельта корельований і центрований випадковий процес, можна записати:

$$M \{ \xi_{i,m} \cdot \xi_{i,x} \} = \sigma_\xi^2 \delta(m-x),$$

де $\delta(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases}$ – дельта-функція Кронекера.

Застосовуючи формулу для сумісно гауссових та центрованих випадкових величин [8]

$$\begin{aligned} M[\xi_1 \xi_2 \xi_3 \xi_4] &= M[\xi_1 \xi_2] M[\xi_3 \xi_4] + \\ &+ M[\xi_1 \xi_3] M[\xi_2 \xi_4] + M[\xi_1 \xi_4] M[\xi_2 \xi_3]; \end{aligned} \quad (9)$$

знайдемо другі початкові моменти доданків:

$$\begin{aligned} m_2(\eta_{11}) &= M \left\{ \left[\sum_{m=1}^N \xi_{0,m} \cdot \xi_{i,m} \right]^2 \right\} = \\ &= \sum_{m=1}^N \sum_{x=1}^N M \{ \xi_{0,m} \cdot \xi_{i,m} \cdot \xi_{0,x} \cdot \xi_{i,x} \} = \\ &= \sum_{m=1}^N \sum_{\substack{x=1 \\ x \neq m}}^N M \{ \xi_{0,m} \cdot \xi_{0,x} \} \sigma_\xi^2 \delta(m-x) + \\ &+ \sum_{m=1}^N [M \{ \xi_{0,m}^2 \} M \{ \xi_{i,m}^2 \}] = \sigma_\xi^4 N. \end{aligned} \quad (10)$$

Відповідно для інших доданків в (6) маємо:

$$m_2(\eta_{12}) = K \cdot \sigma_\xi^4 N; \quad (11)$$

$$m_2(\eta_{22}) = K^2 \sigma_\xi^4 N. \quad (12)$$

$$m_2(\eta_{13}) = m_2(\eta_{31}) = \sigma_\xi^2 \cdot \sigma_n^2 \cdot N; \quad (13)$$

$$m_2(\eta_{23}) = m_2(\eta_{32}) = K \cdot \sigma_\xi^2 \cdot \sigma_n^2 \cdot N. \quad (14)$$

$$m_2(\eta_{33}) = \sigma_n^4 N. \quad (15)$$

$$\text{Складова } \eta_{21}^2 = \sum_{j=1}^K \alpha_j \sum_{m=1}^N \xi_{i,m} \cdot \xi_{j,m} \text{ міс-}$$

тить елементи, які підпорядковуються різним розподілам:

$$\eta_{21}^G = \sum_{j=1, j \neq i}^K \alpha_j \sum_{m=1}^N \xi_{i,m} \cdot \xi_{j,m}, \quad \text{– гауссів при } N \gg 1;$$

$$\eta_{21}^\chi = \alpha_i \sum_{m=1}^N \xi_{i,m}^2 \quad \text{– Хі-квадрат. Відповідно}$$

моменти другого порядку матимуть вигляд:

$$m_2(\eta_{21}^G) = \sigma_\xi^4 N \cdot (K-1); \quad (16)$$

$$m_2(\eta_{21}^\chi) = \sigma_\xi^4 N^2 + 2\sigma_\xi^4 N. \quad (17)$$

Значення математичного сподівання від подвоєних добутків дорівнюють нулю:

$$m_1(\eta_{i,j} \cdot \eta_{n,k}) = 0, \quad i, j, n, k = \overline{1,3}, \quad i, j \neq n, k.$$

Складові виразу (6), за винятком η_{21} , мають розподіл, який при значеннях $N \gg 1$ наближається до гауссового. Доданок η_{21} містить складову, яка має розподіл χ^2 (Хі-квадрат) з N ступенями свободи [9]. Вплив цієї складової при гауссовій апроксимації інших складових на завадостійкість модема є

задачею цього аналізу. Для цього доданки, отримані у формулах (10)–(17), запишемо роздільно відповідно до розподілів, якими вони апроксимуються:

$$m_2^{g_i(G)} = \sigma_\xi^4 N(1 + K + (K - 1) + K^2) + 2\sigma_\xi^2 \cdot \sigma_n^2 \cdot N(1 + K) + \sigma_n^4 N;$$

$$m_2^{g_i(\chi)} = \sigma_\xi^4 N^2 + 2\sigma_\xi^4 N = \sigma_\xi^4 (N^2 + 2N);$$

Визначимо дисперсії ВВ $g_i^{<r>}$, $r \in \{G, \chi\}$,

$$D_{<G>}^{g_i} = m_2^{g_i} - (m_1^{g_i})^2 = N[\sigma_\xi^4(2K + K^2) + 2\sigma_\xi^2 \cdot \sigma_n^2 \cdot (1 + K) + \sigma_n^4]; \quad (18)$$

$$D_{<\chi>}^{g_i} = m_2^{g_i} - (m_1^{g_i})^2 =$$

$$\sigma_\xi^4(N^2 + 2N) - \alpha_i^2 \cdot \sigma_\xi^4 \cdot N^2 = 2\sigma_\xi^4 N;$$

Таким чином, величина $\mathcal{G}$ як сума незалежних ВВ з гауссовим та χ^2 розподілом має розподіл, що визначений згортою розподілів, і її щільність імовірності дорівнює [10]:

$$\begin{aligned} \omega_{g_i^{<G>} + g_i^{<\chi>}}(y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \omega_{g_i^{<G>}}(\alpha y - x) \omega_{g_i^{<\chi>}}(x) dx = \int_0^{\infty} \omega_{g_i^{<G>}}(\alpha y - x) \omega_{g_i^{<\chi>}}(x) dx = \\ &= \frac{\int_0^{\infty} x^{N/2-1} \exp[-x/(2\sigma_\xi^2) - (\alpha y - x)^2/(2D_{(G)})] dx}{\Gamma(N/2) \sqrt{2\pi D_{(G)}} (2\sigma_\xi^2)^N}. \end{aligned}$$

де $\Gamma(v) = \int_0^{\infty} x^{v-1} e^{-x} dx$ – гамма-функція.

Ймовірність помилки P_{ber} демодулятором при рівноймовірній апіорній передачі бінарних посиліток буде визначена із виразу

$$P_{\text{ber}} = \int_{-\infty}^0 \omega_{g_{1(G)} + g_{2(\chi)}}(y) dy = \frac{\int_{-\infty}^0 \int_0^{\infty} x^{N/2-1} \exp[-\frac{x}{2\sigma_\xi^2} - \frac{(y-x)^2}{2D_{(G)}}] dx dy}{\Gamma(N/2) \sqrt{2\pi D_{(G)}} (2\sigma_\xi^2)^N}. \quad (19)$$

Для розрахунків завадостійкості демодулятора по (19) доцільно виділити параметр h^2 – перевищення сигнал/шум

$$h^2 = \frac{E_b}{N_0},$$

де E_b – енергія сигнальної складової інформаційного біта;

$N_0 = 2\sigma_n^2$ – одностороння спектральна щільність потужності завади.

Енергія переданого сигналу системи дорівнює

$$E = (K + 1)\sigma_\xi^2 N.$$

Для того щоб визначити ймовірність помилки i -го користувача, у виразі h^2 слід взяти лише частину загальної енергії,

що рівномірно розподілена між K користувачами:

$$E_b = (1 + 1/K)\sigma_\xi^2 N$$

тому

$$h^2 = \frac{E_b}{N_0} = \frac{(1 + 1/K)\sigma_\xi^2 N}{2\sigma_n^2}.$$

$$\sigma_\xi^2 = \frac{h^2 \cdot 2\sigma_n^2}{(1 + 1/K)N}. \quad (20)$$

В рівнянні (20) приймемо $\sigma_n^2 = 1$, тоді

$$\sigma_\xi^2 = \frac{2 \cdot h^2}{(1 + 1/K)N} = Ah^2,$$

де позначено $A = \frac{2}{(1 + 1/K)N}$.

Таким чином, (19) набуде вигляду

$$P_{\text{ber}} = \frac{\int_{-\infty}^0 \int_0^{\infty} x^{N/2-1} \exp\left[-\frac{x}{2Ah^2} - \frac{(y-x)^2}{2N[A^2h^4(2K+K^2)+2Ah^2 \cdot (1+K)+1]}\right] dx dy}{\Gamma(N/2) \sqrt{2\pi \cdot N[A^2h^4(2K+K^2)+2Ah^2 \cdot (1+K)+1]} \cdot (2Ah^2)^N}. \quad (21)$$

На графіку (рисунок 1) представлено розрахунки по (21) ймовірності виникнення помилки P_{BER} від відношення сигнал/завада h^2 при різній кількості користувачів та сталій кількості відліків ($N=100$).

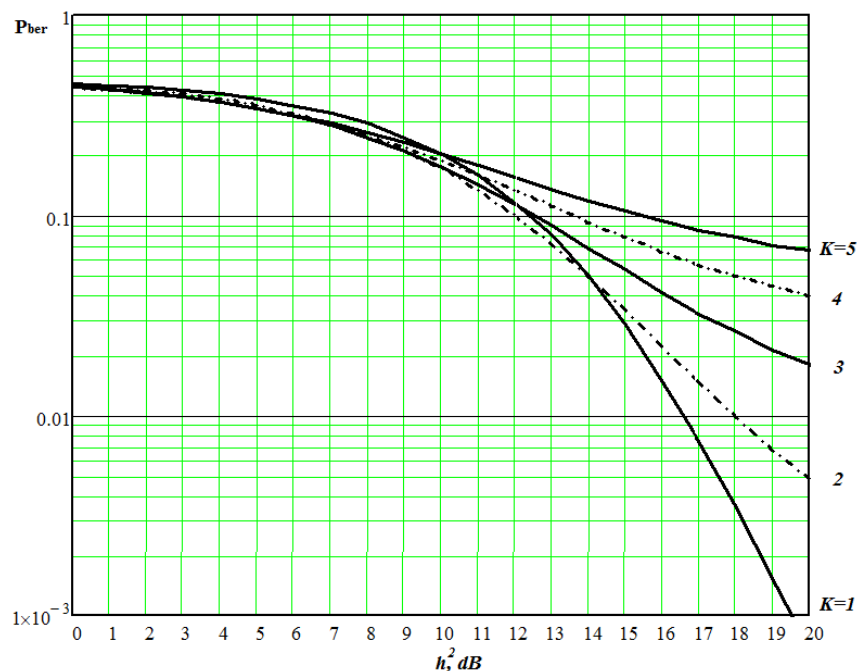


Рисунок 1 – Залежність ймовірності виникнення помилки P_{BER} від відношення сигнал/завада h^2 при різній кількості користувачів

На рисунку 2 представлено результати імітаційного моделювання модема при різній кількості користувачів та сталій кількості відліків $N=100$.

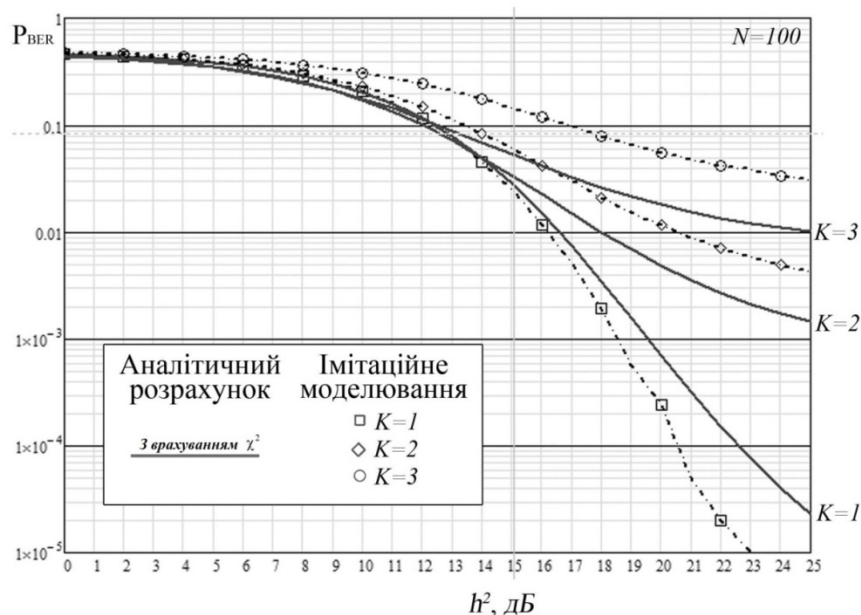


Рисунок 2 – Залежність ймовірності виникнення помилки P_{BER} від відношення сигнал/завада h^2 з результатами імітаційного моделювання

На рисунку 3 наведено залежність ймовірності помилки від кількості відліків інформаційного символу N при сталому відношенні сигнал/завада h^2 .

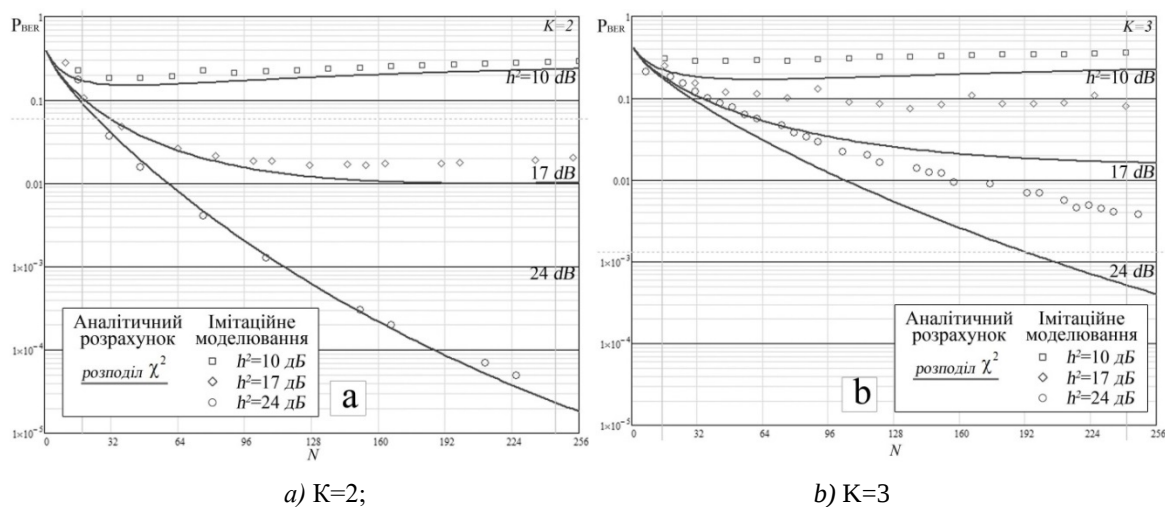


Рисунок 3 – Залежність ймовірності виникнення помилки P_{BER} від N відліків при сталих значеннях відношення сигнал/завада h^2 та кількості користувачів

У наведених залежностях (рисунку 3) можна визначити екстремум типу мінімуму. При збільшенні перевищення h^2 екстремальне значення величини N збільшується. Аналізуючи отримані дані (рисунку 3),

отримаємо оптимальне значення кількості відліків для заданого відношення сигнал/завада h^2 за допомогою використання методу експоненціальної регресії:

$$N_{opt} = e^{a+b \cdot h^2};$$

$$\text{де } b = \frac{n \cdot \sum_{k=1}^K h_k^2 \cdot \ln(N_k) - \sum_{k=1}^K h_k^2 \sum_{k=1}^K \ln(N_k)}{n \cdot \sum_{k=1}^K (h_k^2)^2 - \left(\sum_{k=1}^K h_k^2 \right)^2}; \quad a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^K \ln(N_k) - \frac{b}{n} \sum_{k=1}^K h_k^2.$$

У таблиці 1 наведено значення обраних параметрів для різної кількості користувачів системи.

Таблиця 1 – Параметри експоненціальної регресії для K користувачів

Кількість користувачів	Параметри	
K	a	b
1	0,761	0,232
2	1,489	0,227
3	1,78	0,233
4	2,117	0,229

На рисунку 4 представлено експоненціальну залежність оптимальної кількості (N) відліків від рівня сигнал-завада при різній кількості користувачів.

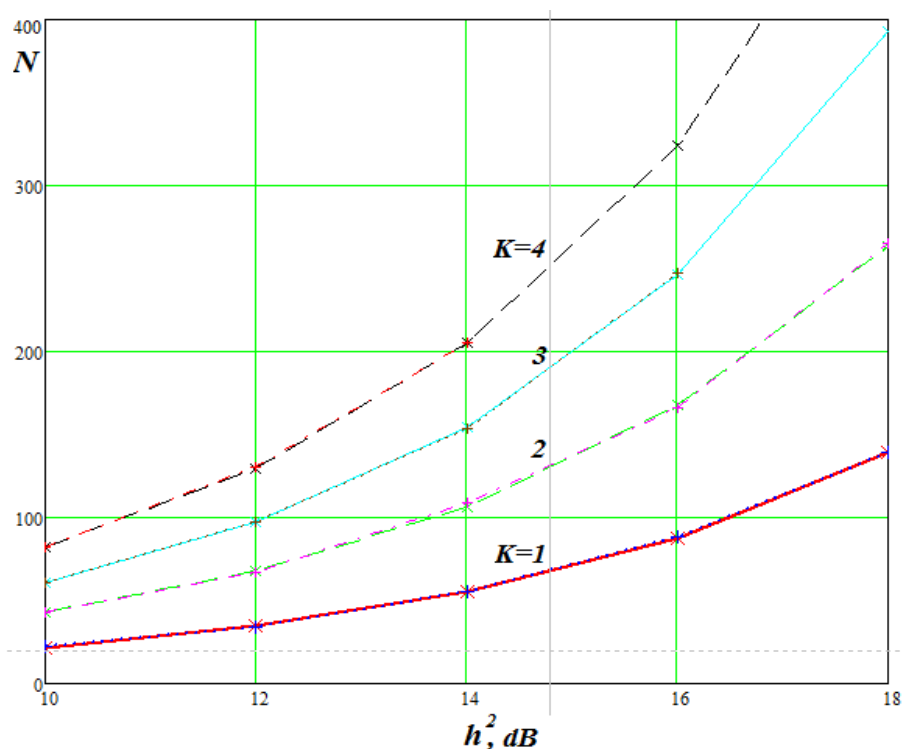


Рисунок 4 – Залежність оптимальної кількості відліків інформаційного біта, N від значення відношення сигнал/завада h^2 при різній кількості користувачів, K

Висновки. Проведений аналіз завадостійкості модема множинного доступу актуальний тим, що у формулі розрахунку завадостійкості враховано вплив квадратичної складової цифрового демодулятора. Це дає змогу наблизити теоретичні результати до даних імітаційної моделі. Існуюча різниця між даними моделі і теоретичними результатами пояснюється точним описом закону розподілу лише квадратичної складової з апроксимацією гауссовим законом розподілу інших складових демодулятора. Уточнення теоретичної оцінки з урахування наявних розподілів інших складових є наступною задачею аналізу.

Виявлено екстремум у залежності завадостійкості модема від кількості відліків цифрового сигналу демодулятора. Отримано вираз для обчислення екстремального значення в залежності від відношення сигнал/шум при різній кількості користувачів.

Список літератури

[1] Ю. Г. Лега, С. М. Первунінський, та С. С. Гузнін, "Дослідження завадостійкості М-позиційного автокореляційного приймача шумових сигналів в каналі з адитивним білим гауссовим шумом", *Вісник Національного університету*

"Львівська політехніка". *Радіoeлектроніка та телекомунікації*, № 645, с. 167-176, 2009.

- [2] П. Д. Журавель, "Організація множинного доступу в системах передачі даних шумовими сигналами із використанням ортогоналізації сигналів передавача", *Науковий вісник Чернівецького національного університету ім. Ю. Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти*, т. 4, вип. 2, с. 15-19, 2013.
- [3] А. А. Харкевич, "Передача сигналов модулированным шумом", *Электросвязь*, № 11, с. 42-46, 1957.
- [4] G. Kolumban et al., "The role of synchronization in digital communications using chaos. Part I: fundamentals of digital communications", *IEEE transactions on circuits and systems I*, vol. 44, no. 10, pp. 927-936, 1997.
- [5] W. M. Tam, F. Lau, and C. Tse, *Digital communication with chaos*. N.Y.: Elsevier, 2006.
- [6] W. M. Tam, F. C. M. Lau, and C. K. Tse, "Generalized correlation-delay-shift-keying scheme for noncoherent chaos-based communication systems", *IEEE transactions on circuits and systems I*, vol. 53, no. 3, pp. 712-721, 2006.

- [7] F. C. M. Lau, M. M. Yip, C. K. Tse, and S. F. Hau, "A multiple access technique for differential chaos shift keying", *IEEE Transactions on Circuit systems I*, vol. 49, no. 1, pp. 96-104, 2002.
- [8] В. И. Тихонов, *Статистическая радиотехника*. Москва: Radio and communication, 1982.
- [9] Р. Н. Вадзинский, *Справочник по вероятностным распределениям*. Санкт-Петербург: Наука, 2001.
- [10] С. М. Первунінський, та В. В. Олексюк, "Аналіз бінарного цифрового модема шумових сигналів з урахуванням впливу квадратичної складової демодулятора", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 35-40, 2018 (Технічні науки).
- [3] A. A. Kharkevich, "Signal transmission by modulated noise", *Elektrosviaz*, no. 11, pp. 42-46, 1957 [in Russian].
- [4] G. Kolumban et al., "The role of synchronization in digital communications using chaos. Part I: fundamentals of digital communications", *IEEE transactions on circuits and systems I*, vol. 44, no. 10, pp. 927-936, 1997.
- [5] W. M. Tam, F. Lau, and C. Tse, *Digital communication with chaos*. N.Y.: Elsevier, 2006.
- [6] W. M. Tam, F. C. M. Lau, and C. K. Tse, "Generalized correlation-delay-shift-keying scheme for noncoherent chaos-based communication systems", *IEEE transactions on circuits and systems I*, vol. 53, no. 3, pp. 712-721, 2006.
- [7] F. C. M. Lau, M. M. Yip, C. K. Tse, and S. F. Hau, "A multiple access technique for differential chaos shift keying", *IEEE Transactions on Circuit systems I*, vol. 49, no. 1, pp. 96-104, 2002.
- [8] V. I. Tihonov, *Statistical radio engineering*. Moscow: Radio i sviaz, 1982 [in Russian].
- [9] R. N. Vadzinskij, *Handbook on probabilistic distributions*. St. Petersburg: Nauka, 2001 [in Russian].
- [10] S. M. Pervuninsky, and V. V. Oleksjuk, "Analysis of binary digital modem of noise signals taking into account the effect of demodulator quadratic component", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu*, no. 1, pp. 35-40, 2018 [in Ukrainian].

References

- [1] Yu. G. Lega, S. M. Pervuninsky, and S. S. Ghuznin, "Investigation of the noise immunity of M-position auto-correlation receiver of noise signals in the channel with additive white Gaussian noise", *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*. *Radioelektronika ta telekomunikatsii*, no. 645, pp. 167-176, 2009 [in Ukrainian].
- [2] P. D. Zhuravel, "Organization of multiple access in data transmission systems by noise signals using orthogonalization of transmitter signals", *Naukovyi visnyk Chernivets'koho natsionalnoho universytetu im. Yu. Fedkovycha. Seriya: Kompiuterni sys-*

S. M. Pervuninsky, Dr. Tech. Sc., professor,
e-mail: cherkpervun@rambler.ru

V. V. Oleksjuk, postgraduate student,
e-mail: vadim.oleksuk@gmail.com

Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

NOISE IMMUNITY OF THE MODEM OF NOISE SIGNALS MULTIPLE ACCESS TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECT OF QUADRATIC COMPONENT

The current state of the development of the elemental base of radio systems stimulates both the improvement of the characteristics of existing traditional systems and the study of alternative methods of information transmission. The research of modems with the use of a signal with an extended spectrum as an information carrier is of great importance in improving the information transmission systems.

The issue of improving the modems with noise signals involves an increase in the accuracy of theoretical analysis of noise immunity of the proposed methods of demodulating the signal information components. The demodulator, for which the analysis is carried out, is characterized by the fact that in the functional for the evaluation of the received information bit there are components with different probability distribution laws. The consideration of the quadratic component influence on the noise immunity of the modem of multiple access in the analysis is performed for the first time. The article investigates the noise immunity of the modem of multiple access, which uses noise Gaussian signals as a carrier. The analytical expressions for calculating the noise immunity of the modem, when every user of the system uses a binary digital demodulator of transmitted signal, are obtained. The noise immunity of the modem of multiple access is analyzed taking into account the influence of input components of the signal, which are approximated by Gaussian and Chi-squared laws of probability distribution. Theoretical estimations of the noise immunity of the digital modem of multiple access, checked on the simulation model, are obtained. Theoretical results of the analysis have allowed to determine the dependence of the noise immunity of the digital demodulator on the amount of input signal readings at the clock interval. The optimum values of the amount of input signal readings, depending on the number of users of the system and the excess of the signal over the interference in the additive Gaussian communication channel are established.

Keywords: autocorrelation communication system, multiple accesses, noise signal, quadratic component, noise immunity.